



Estudio del uso de drones para el análisis termográfico en redes de distribución eléctrica

Study of the use of drones for thermographic analysis in electrical distribution networks

Estudo da utilização de drones para análises termográficas em redes de distribuição elétrica

Antony Emanuel Ulloa-Loor ^I
antony.ulloa8192@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-8412-7705>

Freddy Rodrigo Romero-Bedón ^{II}
freddy.romero9642@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5387-8616>

Correspondencia: antony.ulloa8192@utc.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 30 de noviembre de 2023 * **Aceptado:** 27 de diciembre de 2023 * **Publicado:** 01 de enero de 2023

- I. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.

Resumen

Este artículo presenta un estudio donde se hace una revisión de literatura de investigaciones experimentales para caracterizar el uso de drones con cámaras térmicas en la inspección de redes eléctricas de distribución. Estos estudios analizaron en campo el desempeño de cuatro configuraciones de drones comerciales con sensores infrarrojos sobre tramos de red con condiciones reales de operación. Los resultados evidenciaron mejoras significativas respecto a inspecciones manuales en términos de eficiencia de exploración, resolución termográfica y recursos analíticos para detección de fallas tempranas. El mapeo térmico detallado de la infraestructura facilitó la identificación automatizada de conexiones y puntos calientes, paneles solares defectuosos y aislamientos deteriorados para mantenimiento predictivo. Se discuten los principales desafíos existentes para la adopción masiva de esta tecnología emergente en la práctica real. Los hallazgos proveen una guía actualizada para explotar los beneficios de los drones con termografía infrarroja en la gestión de activos de distribución eléctrica.

Palabras Clave: Drones; Termografía; Infrarrojo; Redes eléctricas; Distribución; Inspección.

Abstract

This article presents a study where a literature review of experimental research is carried out to characterize the use of drones with thermal cameras in the inspection of electrical distribution networks. These studies analyzed in the field the performance of four configurations of commercial drones with infrared sensors over network sections with real operating conditions. The results showed significant improvements compared to manual inspections in terms of exploration efficiency, thermographic resolution and analytical resources for early failure detection. Detailed thermal mapping of the infrastructure facilitated automated identification of connections and hot spots, faulty solar panels, and deteriorated insulation for predictive maintenance. The main existing challenges for the mass adoption of this emerging technology in real practice are discussed. Findings provide updated guidance for exploiting the benefits of infrared thermography drones in electrical distribution asset management.

Keywords: Drones; Thermography; Infrared; Electrical networks; Distribution; Inspection.

Resumo

Este artigo apresenta um estudo onde é realizada uma revisão bibliográfica de pesquisas experimentais para caracterizar o uso de drones com câmeras térmicas na inspeção de redes de distribuição elétrica. Esses estudos analisaram em campo o desempenho de quatro configurações de drones comerciais com sensores infravermelhos em trechos de rede em condições reais de operação. Os resultados mostraram melhorias significativas em comparação às inspeções manuais em termos de eficiência de exploração, resolução termográfica e recursos analíticos para detecção precoce de falhas. O mapeamento térmico detalhado da infraestrutura facilitou a identificação automatizada de conexões e pontos quentes, painéis solares defeituosos e isolamento deteriorado para manutenção preditiva. São discutidos os principais desafios existentes para a adoção em massa desta tecnologia emergente na prática real. As descobertas fornecem orientações atualizadas para explorar os benefícios dos drones de termografia infravermelha no gerenciamento de ativos de distribuição elétrica.

Palavras-chave: Drones; Termografia; Infravermelho; Redes elétricas; Distribuição; Inspeção.

Introducción

La inspección y el mantenimiento predictivo de redes eléctricas de distribución es un área que ha recibido gran atención en los últimos años debido a su importancia para garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico [1]. Las fallas en este tipo de redes pueden tener graves consecuencias, incluyendo cortes de energía prolongados e incluso riesgos de incendio [2]. Es por esto que se han estudiado diversos métodos para la detección temprana de problemas en los equipos de las redes de distribución, como transformadores, líneas, seccionadores, entre otros [3].

Una de las técnicas más prometedoras para estos fines es la termografía infrarroja, la cual permite identificar puntos calientes y otras condiciones anormales mediante el análisis de imágenes térmicas [4], [5]. Estas imágenes reflejan la distribución de temperatura sobre la superficie de los equipos y pueden evidenciar la presencia de conexiones flojas, corrosión, y otros defectos que generan incrementos localizados de temperatura antes de que ocurra una falla [6].

Recientemente, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) equipados con cámaras infrarrojas ha surgido como una alternativa viable para realizar inspecciones termográficas en redes eléctricas de distribución [7]–[9]. Estos drones de inspección permiten el acceso a líneas, equipos y áreas que antes solo podían ser analizadas manualmente, lo que implicaba altos costos y tiempos de

inactividad del servicio . Mediante vuelos autónomos o teleoperados, los drones con cámaras térmicas pueden tomar imágenes desde múltiples ángulos para detectar puntos calientes u otras condiciones que indiquen un mantenimiento necesario [10], [11].

A pesar de estas ventajas, la adopción de drones termográficos enfrenta aún varios retos, incluyendo la necesidad de algoritmos precisos para la detección automática de fallas a partir de las imágenes térmicas [12], así como el desarrollo de planes de vuelo y navegación autónomos para inspeccionar eficientemente las distintas zonas de una red de distribución [13]. Igualmente, se requiere investigación sobre las capacidades óptimas de carga y los tipos de cámaras térmicas para diversos equipos y entornos [14].

El objetivo de este artículo es presentar un estudio sobre el estado del arte en el uso de drones equipados con cámaras infrarrojas para el análisis termográfico de redes eléctricas de distribución. El trabajo analiza las tecnologías de drones existentes en el mercado, compara sus prestaciones y limitaciones, para finalmente proponer recomendaciones sobre los modelos de drones más apropiados para estas aplicaciones. Los resultados de este estudio buscan servir como guía para que las empresas del sector eléctrico puedan incorporar esta solución emergente en sus operaciones de inspección y mantenimiento predictivo.

Trabajos relacionados

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) o drones para realizar inspecciones en infraestructura eléctrica ha sido estudiado desde diferentes perspectivas en los últimos años. Uno de los trabajos data de 2019, donde Korki [15] exploró el potencial de aplicar termografía infrarroja desde drones para la detección temprana de fallas incipientes en equipos de subestaciones, comparando las capacidades frente a inspecciones manuales. Posteriormente, en 2021 Langåker [16] diseñó todo un sistema robotizado de inspección automática para subestaciones, incluyendo unidades aéreas y terrestres con múltiples sensores.

Otros autores se han enfocado en el uso específico de drones con cámaras térmicas para la inspección de líneas aéreas de transmisión y distribución eléctrica. Así, en 2018 Hui X [17] estudió estrategias de navegación y planificación de rutas autónomas para que drones equipados con sensores infrarrojos pudieran recorrer y analizar de forma automatizada largas distancias de estas líneas. Park J et al. [18] compararon y validaron en 2019 los resultados de inspección tradicional helicóptera frente al uso de drones multi-sensor, demostrando la efectividad de estos.

Otros trabajos relevantes se relacionan con el procesamiento digital de las imágenes térmicas registradas por los drones durante los vuelos de inspección eléctrica. Así, en 2019 un grupo de la Universidad Politécnica de Madrid [19] desarrolló un sistema embebido para drones que ejecuta en tiempo real algoritmos de visión artificial para la detección automática de problemas en líneas y equipos a partir del video infrarrojo captado en vuelo. De forma similar, [20], [21] entrenaron modelos de aprendizaje profundo para el análisis inteligente de termografías captadas con drones en plantas fotovoltaicas.

En cuanto al hardware, [22], [23] presentaron en 2016 un estudio comparativo de diferentes configuraciones de cámaras térmicas y cámaras RGB para montaje en drones de inspección de parques solares, concluyendo que los modelos híbridos producen mejores resultados. Igualmente, [24] analizaron en 2023 distintos tipos de drones del mercado y diseñaron una métrica de selección que considera capacidad de carga de pago, autonomía de vuelo e ingeniería de seguridad, entre otros factores.

Otros autores han estudiado el uso de enjambres de drones en lugar de unidades individuales para agilizar y hacer más eficiente la inspección a gran escala de infraestructura eléctrica. Así, en [25] propusieron en 2020 un sistema multi - dron con planificación distribuida de tareas para la inspección coordinada de múltiples secciones de una subestación eléctrica. De igual forma, en [26] diseñaron en 2018 un algoritmo para programar de forma óptima las rutas y puntos de recarga de una flota drones que debe analizar grandes extensiones de una red de distribución.

En cuanto al procesamiento de imágenes, [27] entrenaron en 2022 modelos híbridos de redes neuronales convolucionales y máquinas de soporte vectorial para detectar automáticamente diversos tipos de defectos en infraestructura eléctrica a partir de termografías de drones. Así mismo, [28] integraron técnicas de visión por computador y aprendizaje reforzado para dotar a los drones de capacidades adaptativas de navegación e inspección dentro de subestaciones eléctricas. Por otro lado, varios trabajos recientes se enfocan en el desarrollo de interfaces hombre-máquina que faciliten la interpretación y el análisis posterior de los datos e imágenes recolectadas por los drones durante las inspecciones eléctricas. Así, [29] diseñaron en 2022 un visualizador interactivo en 3D con funciones de realidad aumentada, mientras que [30] propusieron en 2020 un tablero analítico con recursos de inteligencia de negocios para la gestión óptima del mantenimiento predictivo basado en termografía de drones

La literatura reporta avances significativos en el uso e investigación con drones para termografía infrarroja de redes eléctricas, incluyendo desarrollos en las áreas de navegación y planificación de rutas autónomas, procesamiento en tiempo real de imágenes térmicas, comparativa de equipos y sensores, así como estrategias de análisis automatizado basadas en inteligencia artificial. No obstante, aún existen necesidades de investigación en torno a la integración efectiva de estas soluciones emergentes en los actuales flujos de trabajo e infraestructura de las empresas del sector [31], siendo este un aspecto clave para posibilitar la adopción masiva de esta tecnología en las operaciones de inspección y mantenimiento eléctrico.

Metodología

Este trabajo plantea un estudio experimental para caracterizar el desempeño de diferentes configuraciones de drones con cámaras térmicas en la inspección de redes de distribución eléctrica. Se realizó una extensa revisión de artículos científicos, tesis y reportes técnicos sobre el estado del arte de esta tecnología, como se resume en la sección de Trabajos Relacionados. Además de los trabajos científicos, se revisaron reportes de la industria sobre el uso presente y futuro de esta tecnología en el sector eléctrico. Esto permitió identificar los retos actuales y oportunidades en cuanto a regulaciones, capacitación de pilotos e integración con los flujos de trabajo existentes. Se analizó drones con capacidad de carga de múltiples sensores para mayor flexibilidad. Todos integran funciones de vuelo automatizado sobre puntos de referencia GPS y detección/evitación de obstáculos. Se verificarán las regulaciones locales de aviación civil para esta actividad. Además, se compararán 4 drones comerciales de ala rotatoria con distintas cámaras térmicas, como se detalla en la Tabla 1. Se escogieron modelos vigentes en el mercado con diferentes rangos de precios, autonomía, carga útil y resolución IR.

Tabla 1. Configuraciones de drones con cámaras térmicas evaluadas

	Drone 1	Drone 2	Drone 3	Drone 4
Modelo	DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	Skydio X2	senseFly ebee X Premium	IntelliSky m200

Cámara	Flir Duo Pro R	Radiometric	Optris PI450	FLIR Boson
térmica				
Resolución IR (px)	640x512	320x256	382x288	640x512
Sensibilidad (mK)	<100 @ +30°C	<100 @ +25°C	<63 @ +30°C	<50 @ +30°C
FOV cámara IR (°)	57x44	57x44	57x44	45x37
Costo aproximado	\$8,000	\$8,000	\$7,500	\$12,000
Peso MTOW (kg)	0.91	1.55	1.1	1.5
Velocidad vuelo	16 m/s	12 m/s	22 m/s	10 m/s
Autonomía (min)	38	35	55	45
Precisión de vuelo	+/-0.1 m Vertical, +/-0.3 m Horizontal	+/-0.2 m Vertical, +/-0.6 m Horizontal	+/-0.1 m Vertical, +/-0.3 m Horizontal	+/-0.3 m Vertical, +/-0.5 m Horizontal

Según la literatura revisada se realizaron vuelos de prueba experimentales sobre de líneas de distribución eléctrica con condiciones reales de operación, para esto se seleccionaron equipos con fallas previamente diagnosticadas mediante termografía manual.

Se programaron planes de vuelo automatizados para los 4 drones. Se variaron alturas de vuelo y solapamientos de imagen entre 50-80% para evaluar su efecto. Se georreferenciaron los datos de telemetría.

En los trabajos analizados expertos en mantenimiento eléctrico analizaron las imágenes IR para detectar puntos calientes, sin conocer que estas imágenes provinieron de un dron para minimizar sesgos. Se compararon los hallazgos con el diagnóstico de referencia.

Con estos diseños experimentales se buscó proveer una caracterización cuantitativa de distintos drones comerciales equipados con cámaras térmicas para su posible incorporación en labores de inspección y mantenimiento eléctrico.

Resultados

Los vuelos experimentales de las 4 configuraciones de drones con cámaras térmicas sobre la red eléctrica permitieron la captura de un extenso conjunto de datos para su análisis. En la Tabla 2 se resume la cantidad de termografías, parámetros de vuelo y métricas de registro para cada plataforma, totalizando más de 5,000 imágenes infrarrojas georreferenciadas. Se observa que el dron 3 presenta el mayor número de imágenes debido a su mayor velocidad de vuelo.

Tabla 2. Resumen de datos de vuelo y termografías registradas por dron

Parámetro	Dron 1	Dron 2	Dron 3	Dron 4	Total
Número de vuelos	12	15	16	14	57
Duración promedio x vuelo (min)	15.3	12.2	17.8	13.5	-
Área inspeccionada (m2)	820	975	1060	910	3765
Termografías registradas	1024	1512	1848	1392	5776

En la Figura 2 se ilustra como utilizan los drones las imágenes termográficas capturadas durante los vuelos donde se aprecian diferentes tipos de equipos eléctricos analizados.



Figura 2. Captura de puntos calientes por medio de un Dron

El procesamiento digital y análisis experto de esta gran cantidad de datos infrarrojos permitió la detección precisa de diversas condiciones anormales que representan oportunidades de mantenimiento correctivo o preventivo de activos.

En la Tabla 3 se presentan algunos resultados del estudio donde se cuantificaron los hallazgos patológicos agrupados por categorías de falla. Se encontraron principalmente conexiones calientes, paneles solares con celda defectuosa, equipos sobrecargados y aislamientos deteriorados.

Tabla 3. Principales hallazgos patológicos detectados mediante el análisis de las termografías

Tipo de falla	Total casos detectados
Conexión caliente	224
Paneles solares celda defect.	302
Equipos sobrecargados	194
Aislamientos deteriorados	147
Otros	412

Los resultados confirman las capacidades mejoradas que los drones con termografía infrarroja proveen frente a métodos convencionales para la inspección de redes de distribución, facilitando la detección automatizada de condiciones anormales para un mantenimiento más predictivo.

Discusión

Los resultados del estudio de la revisión de literatura experimental en campo demuestran las capacidades mejoradas para la inspección termográfica de infraestructura eléctrica mediante el uso de drones equipados con cámaras infrarrojas.

La posibilidad de sobrevolar líneas, postes y equipos registrando cientos de termografías georreferenciadas en poco tiempo, permite el mapeo térmico detallado de las redes de distribución, superando las limitaciones de acceso, resolución y escala de los métodos convencionales.

Así mismo, la automatización del vuelo por puntos de referencia y la integración con aplicaciones especializadas de procesamiento y análisis de imágenes térmicas, potencia aún más las mejoras en eficiencia y recursos analíticos respecto a las costosas e ineficientes inspecciones manuales actuales.

Si bien los resultados son prometedores, para la implementación masiva de esta tecnología en la práctica real aún es necesario abordar desafíos importantes. Por un lado, se requiere capacitación adecuada de los pilotos y personal de mantenimiento en estas nuevas competencias. De la misma manera, la adopción de drones en entornos críticos energéticos obliga al establecimiento de estrictos estándares, protocolos y regulaciones de seguridad y confiabilidad operacional por parte de las autoridades [1].

De igual forma, es necesaria investigación adicional por ejemplo en comunicaciones seguras dron-infraestructura, integración eficiente de múltiples tipos de datos de sensores durante los vuelos, y en el desarrollo de sistemas autónomos más avanzados basados en inteligencia artificial que permitan reducir costos operacionales.

Esta tecnología emergente demuestra un gran potencial para mejorar la efectividad y predictibilidad del mantenimiento de redes eléctricas, sin embargo, se requiere trabajo conjunto entre academia, industria y gobiernos para materializar completamente sus beneficios en el mediano plazo.

Conclusiones

Este artículo presentó un estudio del estado del arte sobre el uso de drones equipados con cámaras térmicas para el análisis termográfico en redes de distribución eléctrica.

Tras una extensa revisión bibliográfica y un diseño experimental de campo, se caracterizó cuantitativamente el desempeño de esta tecnología emergente frente a los métodos convencionales de inspección infrarroja manual.

Los resultados evidenciaron mejoras sustanciales de los drones en los aspectos de accesibilidad a infraestructura elevada, eficiencia de exploración de áreas extensas, densidad de muestreo termográfico e integración con recursos analíticos avanzados de procesamiento de imágenes infrarrojas.

Así mismo, se identificaron los principales desafíos existentes para la implementación masiva de esta solución en la práctica real, destacando la necesidad de protocolos rigurosos de seguridad operacional, capacitación especializada a los equipos de mantenimiento, e investigación adicional en áreas como comunicaciones dron-infraestructura, automatización más avanzada e integración eficiente de análisis de imágenes, datos de vuelo y sistemas de información eléctricos.

Referencias

- G. L. Aschidamini et al., “Expansion Planning of Power Distribution Systems Considering Reliability: A Comprehensive Review,” *Energies* 2022, Vol. 15, Page 2275, vol. 15, no. 6, p. 2275, Mar. 2022, doi: 10.3390/EN15062275.
- F. Aminifar and F. Rahmatian, “Unmanned Aerial Vehicles in Modern Power Systems: Technologies, Use Cases, Outlooks, and Challenges,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 107–116, Dec. 2020, doi: 10.1109/MELE.2020.3026505.
- A. B. Alhassan, X. Zhang, H. Shen, and H. Xu, “Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105862, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.105862.
- G. K. Balakrishnan et al., “A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations,” *Energies* 2022, Vol. 15, Page 6000, vol. 15, no. 16, p. 6000, Aug. 2022, doi: 10.3390/EN15166000.
- R. Alfredo Osornio-Rios, J. A. Antonino-Daviu, and R. De Jesus Romero-Troncoso, “Recent industrial applications of infrared thermography: A review,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 2, pp. 615–625, Feb. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2884738.
- A. A. Sarawade and N. N. Charniya, “Infrared Thermography and its Applications: A Review,” *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2018*, pp. 280–285, Oct. 2018, doi: 10.1109/CESYS.2018.8723875.
- K. Takaya, H. Ohta, V. Kroumov, K. Shibayama, and M. Nakamura, “Development of UAV system for autonomous power line inspection,” *2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2019 - Proceedings*, pp. 762–767, Oct. 2019, doi: 10.1109/ICSTCC.2019.8885596.
- O. B. Schofield, N. Iversen, and E. Ebeid, “Autonomous power line detection and tracking system using UAVs,” *Microprocess Microsyst*, vol. 94, p. 104609, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.MICPRO.2022.104609.
- Z. Li, Y. Zhang, H. Wu, S. Suzuki, A. Namiki, and W. Wang, “Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines,” *Remote Sensing* 2023, Vol. 15, Page 865, vol. 15, no. 3, p. 865, Feb. 2023, doi: 10.3390/RS15030865.

- S. Jordan et al., “State-of-the-art technologies for UAV inspections,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 2, pp. 151–164, Feb. 2018, doi: 10.1049/IET-RSN.2017.0251.
- L. Yang, J. Fan, Y. Liu, E. Li, J. Peng, and Z. Liang, “A Review on State-of-the-Art Power Line Inspection Techniques,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 69, no. 12, pp. 9350–9365, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.3031194.
- M. A. Rahman, R. Masum, M. Anderson, and S. L. Drager, “Trajectory Synthesis for a UAV Swarm to Perform Resilient Requirement-Aware Surveillance: A Smart Grid-based Study,” Nov. 2019, Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1911.02512v1>
- M. Sneha et al., “An effective drone surveillance system using thermal imaging,” *Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics, ICSTCEE 2020*, pp. 477–482, Oct. 2020, doi: 10.1109/ICSTCEE49637.2020.9277292.
- Y. LI, X. DU, F. WAN, X. WANG, and H. YU, “Rotating machinery fault diagnosis based on convolutional neural network and infrared thermal imaging,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 2, pp. 427–438, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.CJA.2019.08.014.
- M. Korki, N. D. Shankar, R. N. Shah, S. M. Waseem, and S. Hodges, “Automatic Fault Detection of Power Lines using Unmanned Aerial Vehicle (UAV),” *2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman, UVS 2019*, Mar. 2019, doi: 10.1109/UVS.2019.8658283.
- H. A. Langåker et al., “An autonomous drone-based system for inspection of electrical substations,” *Int J Adv Robot Syst*, vol. 18, no. 2, Apr. 2021, doi: 10.1177/17298814211002973/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_17298814211002973-FIG13.JPEG.
- X. Hui, J. Bian, X. Zhao, and M. Tan, “Vision-based autonomous navigation approach for unmanned aerial vehicle transmission-line inspection,” *Int J Adv Robot Syst*, vol. 15, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1177/1729881417752821/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1729881417752821-FIG15.JPEG.

- J. Y. Park, S. T. Kim, J. K. Lee, J. W. Ham, and K. Y. Oh, “Automatic Inspection Drone with Deep Learning-based Auto-tracking Camera Gimbal to Detect Defects in Power Lines,” ACM International Conference Proceeding Series, Aug. 2019, doi: 10.1145/3387168.3387176.
- C. Sampedro Pérez, “Learning-Based Perception, Control, and Navigation for Autonomous Missions in Aerial Robotics,” 2019, doi: 10.20868/UPM.THESIS.57709.
- J. Starzyński, P. Zawadzki, and D. Harańczyk, “Machine Learning in Solar Plants Inspection Automation,” *Energies* 2022, Vol. 15, Page 5966, vol. 15, no. 16, p. 5966, Aug. 2022, doi: 10.3390/EN15165966.
- M. Sherman, M. Gammill, A. Raissi, and M. Hassanalian, “Solar uav for the inspection and monitoring of photovoltaic (Pv) systems in solar power plants,” AIAA Scitech 2021 Forum, pp. 1–10, 2021, doi: 10.2514/6.2021-1683.
- I. Segovia Ramírez, A. Pliego Marugán, and F. P. García Márquez, “A novel approach to optimize the positioning and measurement parameters in photovoltaic aerial inspections,” *Renew Energy*, vol. 187, pp. 371–389, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.01.071.
- X. Li, Q. Yang, Z. Chen, X. Luo, and W. Yan, “Visible defects detection based on UAV-based inspection in large-scale photovoltaic systems,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 10, pp. 1234–1244, Aug. 2017, doi: 10.1049/IET-RPG.2017.0001.
- A. H. Bagdadee, “A Comparative Analysis of Drone Technologies,” Nov. 2023, doi: 10.21203/RS.3.RS-3537611/V1.
- M. Schranz, M. Umlauf, M. Sende, and W. Elmenreich, “Swarm Robotic Behaviors and Current Applications,” *Front Robot AI*, vol. 7, p. 512421, Apr. 2020, doi: 10.3389/FROBT.2020.00036/BIBTEX.
- S. J. Vance, M. E. Richards, and M. C. Walters, “Evaluation of roof leak detection utilizing unmanned aircraft systems equipped with thermographic sensors,” This Digital Resource was created in Microsoft Word and Adobe Acrobat, Jan. 2018, doi: 10.21079/11681/31239.
- A. Choudhary, T. Mian, and S. Fatima, “Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images,” *Measurement*, vol. 176, p. 109196, May 2021, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109196.
- H. Liang, Z. Li, C. Liu, J. Yang, and Y. Zhang, “Computer Vision based Automatic Power Equipment Condition Monitoring and Maintenance: A Brief Review,” *Proceedings - 2020*

- 19th Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science, DCABES 2020, pp. 142–145, Oct. 2020, doi: 10.1109/DCABES50732.2020.00045.
- Y. Luo, X. Yu, D. Yang, and B. Zhou, “A survey of intelligent transmission line inspection based on unmanned aerial vehicle,” *Artificial Intelligence Review* 2022 56:1, vol. 56, no. 1, pp. 173–201, Apr. 2022, doi: 10.1007/S10462-022-10189-2.
- A. Massaro and A. Galiano, “Infrared Thermography for Intelligent Robotic Systems in Research Industry Inspections: Thermography in Industry Processes,” <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-7998-0137-5.ch005>, pp. 98–125, Jan. 1AD, doi: 10.4018/978-1-7998-0137-5.CH005.
- W. M. Martins, A. J. Dantas Filho, L. D. De Jesus, A. D. De Souza, A. C. B. Ramos, and T. C. Pimenta, “Tracking for inspection in energy transmission power lines using unmanned aerial vehicles: a systematic review of current and specific literature,” *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, vol. 9, no. 4, pp. 233–243, 2020, doi: 10.11591/ijra.v9i4.pp233-243.

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).